

## УДК 531.74

*В.С. Кузьменко, студент гр. ВМ-61-2, к.т.н., доц. Стаценко О.В.*  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

# ВИМІРЮВАННЯ КУТА НАХИЛУ ПОВЕРХНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

**Анотація.** Стаття присвячена визначенню підходів до вимірювання кута нахилу поверхні. В статті розглянуті основні підходи до побудови таких пристроїв, визначені особливості використання трьохосьових акселерометрів для вирішення цієї задачі. Розроблена структура пристрою для вимірювання кута нахилу поверхні.

**Ключові слова:** інклінометр, трьохосьовий акселерометр.

## ВСТУП

Вимірювання нахилу поверхні є обов'язковим для безпечної експлуатації різноманітних споруд, будівельних машин, промислового обладнання та інше [1]. Загалом пристрої для вимірювання кута нахилу застосовуються:

- в будівництві для визначення крену висотних будівель, опор і прольотів мостових споруд, тунелів;
- гірничій справі для визначення кута і азимута викривлення свердловин і шахт, що дозволяє контролювати їх просторове положення;
- в геодезії та при будівництві транспортних шляхів, магістралей;
- в машинобудуванні, де необхідно контролювати просторове положення маніпуляторів або окремих елементів обладнання;
- в інших застосуваннях.

Під кутом нахилу поверхні розуміють кут (рис.1), що утворений лінією найбільшого нахилу поверхні  $MN$  та її проекцією на горизонтальну площину  $M_1N_1$  [2].

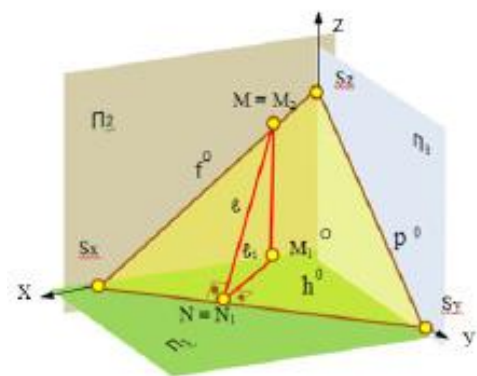


Рисунок 1. Лінія найбільшого нахилу поверхні

Для вимірювання цього кута використовують спеціальні прилади, що мають назву інклінометри. Ці прилади, окрім вимірювання нахилу, також можуть вимірювати напрям розташування приладу. За конструкцією розрізняють інклінометри рідинні, маятникові, магнітні, фотооптичні, електромагнітні та гіроскопічні.

Останнім часом широке розповсюдження отримали інклінометри, у яких в якості чутливого елементу використовуються трьохосьові акселерометри, побудовані на основі мікро електромеханічних систем (MEMS). При цьому використовується ефект гравітації на малих масах, підвішених в пружній опорній конструкції. Коли інклінометр знаходиться в горизонтальному положенні, то вимірюється ємність між електродами. Якщо датчик нахилений, рухома маса і його контакт змінюють положення щодо нерухомого електрода. Це призведе до зміни ємності між масою і несучою структурою. Кут нахилу розраховується за виміряними ємностями.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Сьогодні на ринку присутня значна кількість інклінометрів. Наприклад компанія Kubler пропонує одноосьові та двоосьові інклінометри (рис.2), які мають різний діапазон вимірювання, різну чутливість та точність. Для зручності їх використання вихідний сигнал цих приладів може бути як аналоговим, так і цифровим.

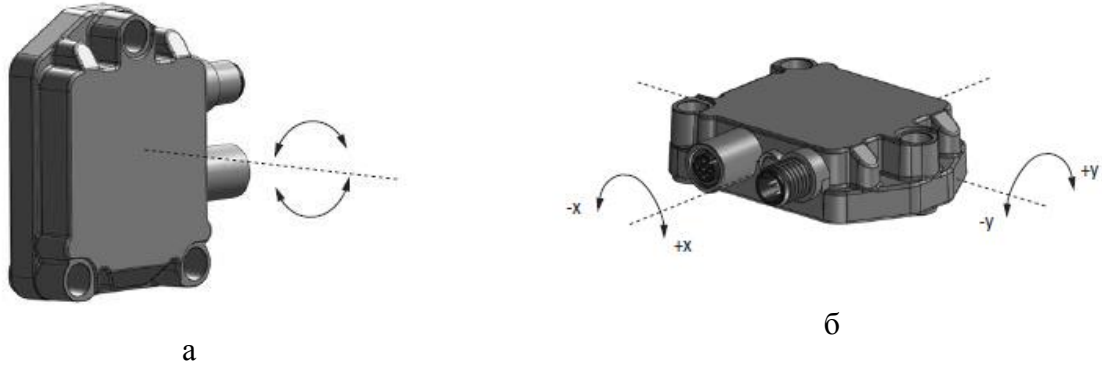


Рисунок 2. Інклінометри фірми Kubler (а – одноосьові, б - двоосьові)

Одночасно з цим виробники не розкривають внутрішньої структури своїх виробів, що ускладнює аналіз їх роботи. Тому актуальною є задача розробки цифрового інклінометра. Побудову такого пристрою доцільно виконувати з використанням трьохосьового акселерометра.

В якості такого акселерометра можна використати ADXL345 [3]. Це є невеликий, тонкий, з наднизьким енергоспоживанням трьохосьовий акселерометр, що забезпечує високу роздільну здатність вимірювань (13 біт) в діапазонах  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  або  $\pm 16g$ . Цифрові вихідні дані відформатовані як 16-бітні послідовності в доповненому коді і доступні через SPI (3- або 4-провідний) або I<sup>2</sup>C цифрові інтерфейси. Функціональна схема датчика показана на рис.3.

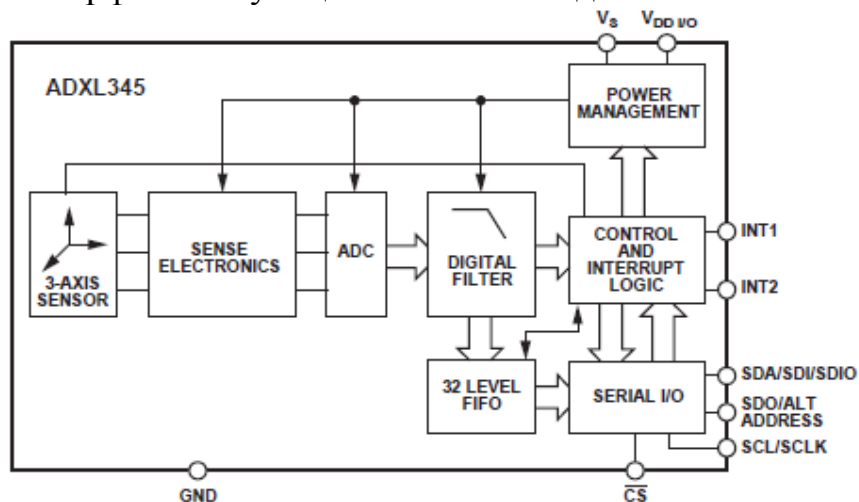


Рисунок 3. Функціональна схема ADXL345

Чутливий елемент цього датчика являє собою полікремнієву поверхневу мікромеханічну структуру, побудовану на верхній частині кремнієвої пластини. Полікремнієві пружини підвішують структуру над поверхнею пластини і надають опір силам сформованим за рахунок прикладеного прискорення.

Відхилення конструкції вимірюється за допомогою диференціальних конденсаторів, які складаються з незалежних нерухомих пластин і пластин, прикріплених до рухомої маси. Прискорення відхиляє пластину і виводить диференціальний конденсатор зі стану рівноваги, внаслідок чого на виході датчика з'являється сигнал, амплітуда якого пропорційна прискоренню. Фазочутлива демодуляції використовуються для визначення величини та полярності прискорення.

Вимірювання цим пристроєм здійснюється лише в стані спокою, оскільки при цьому на чутливий елемент діє лише сила тяжіння [4]. Розрахунок кута нахилу та кута орієнтації здійснюється шляхом обробки проєкцій вектору сили тяжіння на осі акселерометра (рис.4).

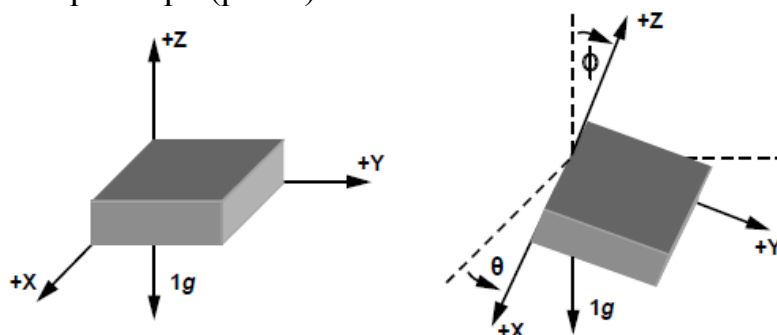


Рисунок 4. Розміщення акселерометра на горизонтальній та довільній поверхні

Як можна побачити на наведеному рисунку, при горизонтальному розміщенні акселерометра, проєкція сили тяжіння на вісі X та Y дорівнюватиме нулю, а проєкція на вісь Z дорівнюватиме  $g$ . При розташуванні пристрою на поверхні, що нахилена під довільним кутом, для визначення кутів нахилу  $\phi$  та орієнтації  $\theta$ , слід скористатися виразами:

$$\theta = \arctan \frac{A_X}{A_Y}, \quad (1)$$

$$\phi = \arccos \frac{A_Z}{g}, \quad (2)$$

де  $A_X$ ,  $A_Y$ ,  $A_Z$  – це є проєкції сили тяжіння на відповідні вісі.

Структурна схема пристрою, для вимірювання вказаних кутів зображена на (рис.5). На схемі використані наступні позначення: БЖ – блок живлення, ДА – трьохосьовий акселерометр, МК – мікроконтролер, І – індикатор, БК – блок клавіш.

Принцип роботи запропонованої системи полягає в наступному: мікроконтролер із заданою періодичністю зчитує з акселерометра покази по трьох його осях, після чого розраховує кути нахилу поверхні та орієнтації приладу та відображає їх на індикаторі. За необхідності при натисканні клавіші покази пристрою можуть бути зафіксовані. Додаткова клавіша використовується для встановлення нульового рівня.

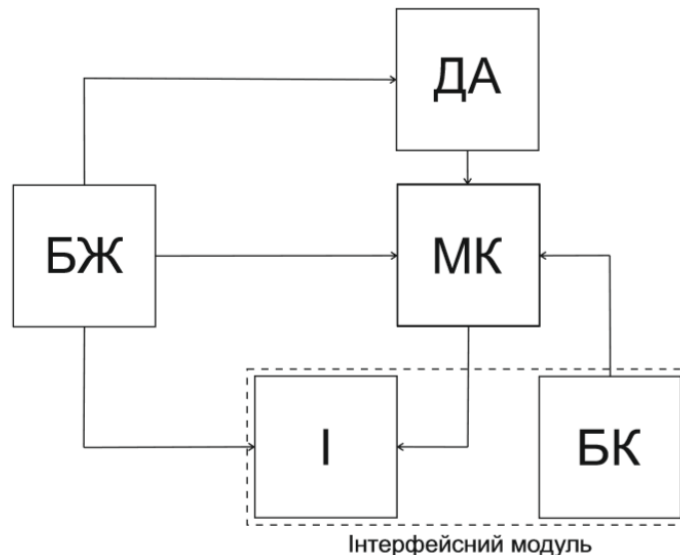


Рисунок 5. Розміщення акселерометра на горизонтальній та довільній поверхні

## ВИСНОВКИ

В статті розглянуті особливості вимірювання кута нахилу поверхні з використанням трьохосового акселерометра та розроблена структура пристрою для реалізації вказаних вимірювань. Подальші дослідження доцільно спрямувати на визначення метрологічних характеристик розробленого пристрою.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Никонов А.В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики/ А.В. Никонов// Вестник СГГА, Новосибирск, 2013. – N 4 - С . 12-18.
- [2] Пиралова О.Ф., Ведякин Ф.Ф. Краткий курс начертательной геометрии. Учебник для вузов. — М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. — 191 с.
- [3] ADXL345: 3-Axis,  $\pm 2$  g/ $\pm 4$  g/ $\pm 8$  g/ $\pm 16$  g Digital Accelerometer Data Sheet (Rev. E). — Analog Devices. — 40 p. — Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>
- [4] Christopher J. Fisher, Using an Accelerometer for Inclination Sensing. Application Note. - Analog Devices. — 40 p. — Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-1057.pdf>

*Наук. керівник – к.т.н., доц. Стаценко О.В.*